

**ПОКРЫТИЕ НА ОСНОВЕ СШИТОГО ПОЛИДИМЕТИЛСИЛОКСАНА
И НАНОЧАСТИЦ РАЗЛИЧНОЙ МОРФОЛОГИИ ДЛЯ ПРИДАНИЯ ТКАНЯМ
СУПЕРГИДРОФОБНЫХ СВОЙСТВ**

В.В. Терехин

*Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН,
Москва 119071, Россия*

@Автор для переписки, e-mail: mendeleeveckm@mail.ru

В работе предложены состав и метод нанесения супергидрофобного композиционного покрытия для тканей на основе химически сшитого полидиметилсилоксана (ПДМС), наночастиц кремнезема (H_2SiO_3), наночастиц со структурой «полистирольное ядро/ SiO_2 -оболочка» и фторалкилсилана (ФАС). Определены оптимальные концентрации компонентов, позволяющие получить покрытие с максимальной степенью гидрофобности (170°). Установлено, что разработанная композиция характеризуется пролонгированной износоустойчивостью к различным видам абразивного воздействия, термообработке, воздействию кислот и оснований. Показано, что наблюдаемые эффекты являются следствием комплексного влияния всех составляющих композиции.

Ключевые слова: супергидрофобные покрытия, наночастицы, текстильные материалы.

**A COATING BASED ON CROSS-LINKED POLYDIMETHYLSILOXANE
AND NANOPARTICLES WITH DIFFERENT MORFOLOGIES
FOR SUPERHYDROPHOBIC TEXTILE FABRICATION**

V.V. Terekhin

*A.N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, Russian Academy of Sciences,
Moscow 119071, Russia*

@Corresponding author e-mail: mendeleeveckm@mail.ru

A composition and method for applying a superhydrophobic composite coating for fabrics based on chemically crosslinked polydimethylsiloxane (PDMS), silica nanoparticles (SiO_2 NP), composite nanoparticles with “polystyrene core/silica shell structure” and a fluoroalkylsilane (FAS) were proposed. It is shown that the degree of hydrophobicity and durability of the composition are the functions of NP, PDMS and FAS concentration and their ratios. The optimal concentrations of the components for the formation of a coating with a maximum degree of hydrophobicity (water static and sliding contact angle $\approx 170^\circ$ and 2° , respectively) were determined. It is established that the developed composition is characterized by prolonged wear resistance to various types of abrasive action, heat treatment, exposure to acids and bases. It was experimentally determined that the observed effects are a consequence of the complex influence of all the constituents of the composition.

Keywords: superhydrophobic coatings, nanoparticles, textile materials.

Введение

Супергидрофобные материалы, поверхность которых характеризуется значением краевого угла по воде (θ) более 150° и его малым гистерезисом, привлекают большое внимание исследователей как в фундаментальной, так и в прикладной науке [1–3]. Такие композиции обладают уникальными свой-

ствами: низкой адгезией, способностью к самоочищению, малой смачиваемостью, благодаря которым они используются в таких приложениях, как очистка нефти от попутной воды [4,5], электроэнергетика [6], в создании влагозащитных [7], антикоррозионных [8, 9] и антиобледенительных [10] покрытий и тонкопленочных композиций, применяемых для снижения гидродинамического сопротивления жидкости

в аэрационных установках [11]. На сегодняшний день актуальна задача получения супергидрофобных покрытий не только на поверхности «твердых» конструкционных материалов, но и на поверхности тканей. При этом необходимо, чтобы после гидрофобизации поверхности тканей они также сохраняли высокие влаго- и воздухопроницаемость. Только при выполнении этих условий возможно их комфортное использование для пошива одежды.

Главной проблемой созданных на сегодняшний день супергидрофобных тканей является их низкая износостойкость, что ограничивает их практическое использование. Стандартным подходом, используемым для увеличения срока службы наносимой на ткань композиции, является сшивание его полимерной составляющей и/или формирование ковалентных связей между покрытием и тканью. Так, в [12] предложен одностадийный метод нанесения покрытия из газовой фазы для получения прочных супергидрофобных тканей. Ткани после обработки демонстрировали супергидрофобные свойства, сохранявшиеся даже после 1450 циклов абразивного износа при истирании под давлением 7.8 кПа. В [13] для придания хлопчатобумажной ткани водоотталкивающих свойств использовали метод радиационно-индуцированной привитой полимеризации. Однако в данной работе не проводили испытания износостойчивости полученной композиции. Альтернативный подход, основанный на эффекте самовосстановления супергидрофобных свойств поверхности, предложен в [14]. Покрытие получали нанесением на ткань смеси фторированного децилполиэдрального олигомерного силсеквиоксана (ФДПОС) и гидролизованного фторалкилсилана. Такое покрытие не только восстанавливало свои супергидрофобные свойства после химического повреждения, но и имело высокую износостойчивость (как при машинной стирке, так и при абразивной обработке). Однако отметим, что подобный синтез является достаточно сложной синтетической задачей.

На базе классического подхода к созданию композиционных материалов в данной работе для получения супергидрофобного покрытия тканей мы предлагаем использовать матрицу из полидиметилсилоксана (ПДМС), содержащую фторалкилсилан (ФАС), наполненную модифицированными молекулами ФАС наночастицами (НЧ) кремнезема (SiO_2) и композитными НЧ (КНЧ) со структурой «полистирольное ядро/ SiO_2 -оболочка». Данная работа является первой частью комплексного исследования возможности использования композитных наночастиц для придания тканям повышенной износостойчивости за счет самовосстановления физико-химических свойств поверхностного слоя композиции, подвергнутого частичному разрушению, при стиму-

лированном высвобождении гидрофобного полимера, формирующего ядро КНЧ. В ходе исследований определены оптимальные содержания компонентов покрытия и исследована его износостойчивость по отношению к действию абразива.

Экспериментальная часть

Материалы. В работе использовали: стирол (99.5%), тетрадекафтороктилтриэтоксисилан (ФАС), тетраэтоксисилан (ТЭОС) (98%), раствор гидроксида аммония в воде (30% мас.), 2,2'-азобис(2-метилпропионамидин)дигидрохлорид (АБМПАД) (97%) (все реактивы Sigma-Aldrich, США), ПДМС (компонент А из Sylgard 184 Silicone Elastomer Kit, Dow Corning, США), этанол, серную кислоту, ацетон (все – марки «х.ч.», ООО «Химреактив»), а также деионизованную воду (удельная электропроводность 0.055 мкСм/см). В качестве образцов использовали образец полиэфирной ткани размером 5 см² (плотность 160 г/м²). Перед нанесением композиции образец ткани последовательно промывали ацетоном и этанолом.

Синтез сферических частиц полистирола. Частицы полистирола (ПС) с положительно заряженной поверхностью синтезировали методом безэмульгаторной эмульсионной полимеризации стирола с использованием катионного инициатора – АБМПАД. Необходимое количество стирола (12.5 г) добавляли к 250 г деионизованной воды (сопротивление 18.2 МОм/см, Millipore Direct-Q, Франция) и удаляли из реакционной среды кислород, барботируя через нее азот в течение 30 мин. Реакционную смесь нагревали до 65 °С, после чего добавляли 0.35 г АБМПАД. Реакцию проводили в течение 24 ч при температуре 65 °С и постоянном барботировании азота. Продукты реакции осаждали центрифугированием (8000 об./мин, 10 мин) и многократно промывали метанолом и деионизованной водой. Полученный осадок высушивали на воздухе.

Синтез композитных частиц со структурой «ПС-ядро/ SiO_2 -оболочка». 100 мг частиц ПС диспергировали в 200 мл смеси воды и этанола (35:165 по объему). pH смеси поддерживали на уровне 11 и регулировали введением раствора гидроксида аммония. Затем в реакционную смесь при интенсивном перемешивании добавляли необходимое количество ТЭОС, нагревали ее до 50 °С и перемешивали в течение 3 ч. По окончании реакции КНЧ отмывали от избытка реагентов, четыре раза повторяя цикл осаждение центрифугированием / редиспергирование в воде. Полученный на заключительной стадии осадок высушивали при комнатной температуре.

Синтез наночастиц SiO_2 . Для синтеза НЧ SiO_2 1 мл ТЭОС растворяли в 25 мл этанола. Затем к раствору добавляли раствор гидроксида аммония в 25 мл эта-

нола (0.2% мас.) и инкубировали при интенсивном перемешивании в течение 3 ч при комнатной температуре. Синтезированные НЧ SiO_2 отмывали от избытка реагентов, пять раз повторяя процедуру осаждение центрифугированием / удаление надосадочной жидкости / редиспергирование осадка в этаноле (скорость центрифугирования 5000 об./мин, 10 мин).

Модификация НЧ SiO_2 и КНЧ молекулами ФАС. К дисперсии НЧ SiO_2 или КНЧ в этаноле добавляли 1% мас. ФАС и перемешивали в течение 5 ч. На завершающей стадии лиофилизировывали НЧ и КНЧ, модифицированные молекулами ФАС («НЧ SiO_2 -ФАС» и «КНЧ-ФАС», соответственно), в установке лиофильной сушки (лиофильная сушка Martin Christ Alpha 1-2 LDplus, Германия).

Формирование композиции. На следующем этапе необходимое количество смеси «НЧ SiO_2 -ФАС» и «КНЧ-ФАС» (в соотношении 4:1 по массе) диспергировали в 25 мл ТГФ и к полученной дисперсии при интенсивном перемешивании добавляли сначала 1.12 г ПДМС (в виде части А набора Sylgard 186 elastomer kit), а затем 2.24 г ФАС. Смесь подвергали УЗ-обработке в течение 20 мин, после чего смешивали с 25 мл раствора сшивающего агента (часть В Sylgard186 elastomer kit, 0.12 г) в ТГФ при интенсивном перемешивании. Конечная концентрация НЧ обоих видов в композиции составляла 1% мас. Полученную смесь подвергали УЗ-обработке в течение 15 мин и затем методом распыления через сопло (диаметр отверстия 0.3 мм, i-spray 300, Sawatec, Лихтенштейн) с расстояния 2 см наносили на квадратный образец ткани площадью 5 cm^2 (объем наносимой дисперсии составлял 600 мкл) и выдерживали образцы при комнатной температуре до полного испарения растворителя. После этого образцы подвергали термообработке при 120 °C в течение 25 мин.

Испытания износоустойчивости композиций

Испытания при повторных машинных стирках проводили согласно ГОСТ 9733.4-83 «Материалы текстильные. Метод испытания устойчивости окраски к стиркам».

Испытания при абразивном воздействии проводили согласно ГОСТ 9913-90 «Материалы текстильные. Методы определения стойкости к истиранию». В качестве модельного абразива использовали образец ткани с предварительно нанесенной по описанному выше протоколу композицией. Абразив помещали на поверхность горизонтально расположенного образца и прикладывали по нормали к его поверхности усилие в 15 кПа. Затем абразив перемещали в горизонтальной плоскости по поверхности образца заданное число раз, периодически измеряя значения статического угла смачивания и угла скольжения.

Исследование устойчивости к действию кислот и оснований. Образец ткани с нанесенной композицией при комнатной температуре выдерживали в водном растворе серной кислоты (pH 1) или растворе КОН (pH 14) и выдерживали в течение суток. Затем образцы извлекали, промывали деионизованной водой и высушивали при комнатной температуре в течение 30 мин.

Исследование устойчивости к повышенным температурам. Образцы выдерживали в кипящей деионизованной воде в течение 60 мин. Затем, после полного охлаждения до комнатной температуры, тщательно промывали водой и высушивали.

Морфологию НЧ и поверхности гидрофобной композиции исследовали методами сканирующей (СЭМ, Quanta 200, FEI, Голландия) и просвечивающей (ПЭМ, Technai G2 20 FEG (FEI, Голландия)) электронной и атомно-силовой микроскопии (АСМ) (Multimode V, Veeco, США).

Размер НЧ измеряли методом динамического светорассеяния. При этом использовали синтезированные золи наночастиц.

Измерения статического угла натекания (θ) и скольжения (θ_{sl}) капель жидкости проводили на установке АСМ D3 (Apex Instrument, Индия). Для каждого образца проводили 5 измерений (объем капли деионизованной воды составлял 5 мкл) в разных точках поверхности, заметно отстоящих друг от друга. Полученные значения усредняли.

При анализе изображений, полученных методом АСМ в режиме прерывистого контакта, рассчитывали среднее значение шероховатости (r) [15].

Спектрофотометрию образцов в ИК-области спектра проводили на ИК-Фурье-спектрометре Nicolet 6700 (Thermo, США) при разрешении 1 cm^{-1} с накоплением сигнала (32 скана).

Воздухопроницаемость образцов ткани измеряли согласно методике ГОСТ 12088-77 «Материалы текстильные и изделия из них. Метод определения воздухопроницаемости».

Результаты и их обсуждение

С использованием описанной в экспериментальной части методики были синтезированы НЧ SiO_2 и КНЧ со средним диаметром ≈ 30 и 135 нм, соответственно (значения получены по СЭМ-изображениям, см. рис. 1). Результаты исследований методом ИК-Фурье-спектроскопии показали, что при последующей инкубации дисперсии НЧ в растворе, содержащем 1% мас. ФАС, происходила их модификация молекулами ФАС – после инкубации на спектрах НЧ появлялись полосы поглощения на длинах волн 1200 и 798 cm^{-1} , относящиеся к колебаниям связей C–F и Si–O–Si, соответственно.



Рис. 1. СЭМ-изображение синтезированных КНЧ (а) и ПЭМ-изображение НЧ SiO₂ (б).

Во всех экспериментах использовали полиэфирную ткань. Показано, что после распыления на образец ткани синтезированной композиции степень ее гидрофобности значительно возрастала. Так, если нанесенная на поверхность необработанной ткани капля воды (объемом 5 мкл) полностью впитывалась в ткань, то после обработки – формировала стабильную в течение длительного времени, практически сферическую каплю. В ходе исследований установлено, что максимальная степень гидрофобности образцов ткани после нанесения композиции достигалась при следующих условиях: соотношение по массе НЧ/КНЧ = 4:1, суммарная концентрация НЧ в наносимом на ткань растворе ПДМС – 1% мас. При таких параметрах наносимого на ткань раствора композиции значение $\theta \approx 170^\circ$, что соответствует общепринятому критерию супергидрофобности. Также отметим, что θ_{sl} составлял всего 2° . При отличных от

указанных концентраций компонентов наблюдалось снижение θ и увеличение θ_{sl} .

На рис. 2 приведены СЭМ-изображения исходной ткани и ткани после нанесения композиции. Видно, что во втором случае на поверхности ткани формировалась полимерная пленка с встроенными в нее «НЧ SiO₂-ФАС» и «КНЧ-ФАС». При этом дополнительно к шероховатости на микромасштабе (образованной волокнами ткани) появлялась и шероховатость на наноуровне, обусловленная присутствующими в поверхностном слое композиции НЧ и КНЧ. Благодаря бимодальности размеров используемых частиц формировалась иерархическая структура, что является одним из ключевых условий супергидрофобности поверхности (см., например, [16]). Анализ результатов АСМ-исследований показал, что после нанесения композиции на образцы величина средней шероховатости поверхности (r) увеличилась почти в 1.5 раза.



Рис. 2. СЭМ-изображения поверхности полиэфирного волокна до (а) и после нанесения (б) композиции.

На вставках на рис. 2б представлены фотографии нанесенной на образец ткани капли воды и СЭМ-изображение поверхности с большим увеличением.

Износостойчивость сформированного покрытия на основе НЧ и ПДМС под действием абразива исследовали, проводя различное количество повторных тестов согласно методике ГОСТ 9913-90. В качестве модельного использовали образец необработанной исходной ткани. Для симуляции разного по интенсивности абразивного воздействия при проведении экспериментов к образцу прикладывали нормальное к его поверхности давление различной величины – 12 и 15 кПа. На рис. 3 приведены графики зависимостей изменения углов смачивания по воде (статического и динамического) от числа циклов абразивного износа. Установлено, что после проведения 3000 циклов абразивного износа

при обоих значениях давления $\theta \approx 170^\circ$. Дальнейшее увеличение числа циклов абразивного износа привело к постепенному снижению значения θ . Отметим, что при этом образцы по-прежнему сохраняли высокий уровень шероховатости на наномасштабе и, следовательно, супергидрофобные свойства, даже после 30000 циклов воздействия абразива. Так, при давлении 12 кПа после указанного числа циклов $\theta \approx 154^\circ$, а r – 2.0 нм. Скорость снижения θ_{sl} несколько выше аналогичного показателя для θ – спустя 24000 циклов при 12 и 15 кПа изменение θ составило 13 и 17° , соответственно.

Одной из критичных характеристик тканей для их использования в производстве текстильных изде-

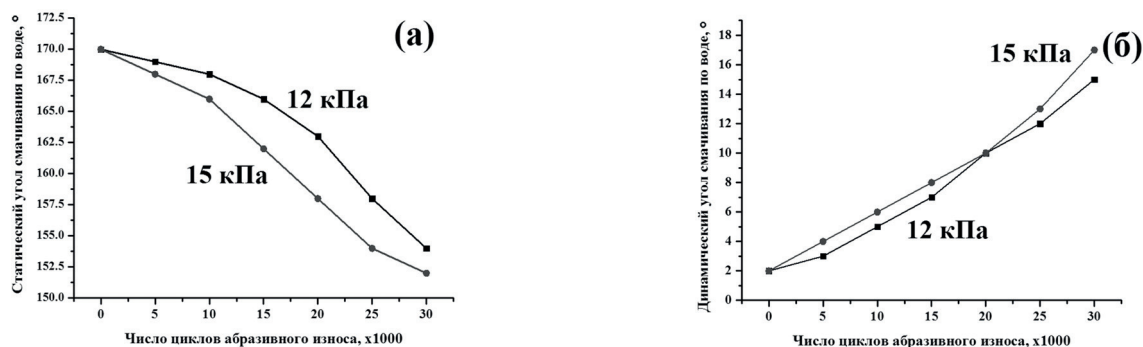


Рис. 3. Зависимость θ (а) и θ_{sl} (б) от числа циклов абразивного износа при разном приложенном по нормали к образцу давлении.

лий является устойчивость к стирке. Количественную оценку этой способности проводили согласно ГОСТ 9733.4-83. Суть метода заключается в проведении заданного числа циклов машинной стирки образцов при стандартизированных условиях. На рис. 4 приведены зависимости θ и θ_{sl} по воде от числа машинных стирок. Видно, что с увеличением числа циклов стирки значение θ постепенно снижалось, и одновременно несколько возрастало значение θ_{sl} . Отметим, что изменение обоих показателей составило менее 5° после 700 циклов стирки (что соответствует примерно 2 годам эксплуатации текстильного изделия). Полученные результаты свидетельствуют о высокой устойчивости разработанного покрытия к мягкому абразивному истиранию. СЭМ-исследования ткани после 700 циклов стирки показали, что поверхность композиции практически полностью сохранила свою морфологию – наблюдался унос некоторого числа встроенных в ПДМС-матрицу НЧ и КНЧ. Также установлено, что разработанная композиция способна сохранять супергидрофобные свойства при термообработке (кипячении в воде). После 7 часов кипячения значение $\theta \approx 167^\circ$.

Образцы ткани, обработанные композицией, характеризовались высокой стойкостью к воздействию сильных кислоты (H_2SO_4 , pH 1) и основания (KOH, pH 14). После инкубации образцов в указанных рас-

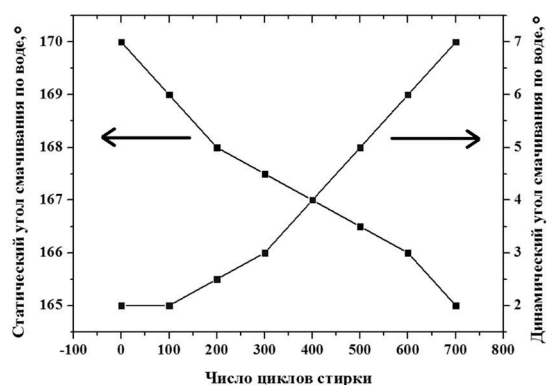


Рис. 4. Изменение значений θ и θ_{sl} в зависимости от числа циклов стирки.

творах в течение 24 ч, последующей промывки водой и сушки при нормальных условиях их значение θ по воде снизилось с исходных θ 171° до θ 167° и 165° , соответственно. Анализ СЭМ-изображений поверхности образцов, сделанных после обработки кислотой или щелочью, показал отсутствие значительных морфологических изменений в структуре поверхностного слоя композиции. Вероятно, наблюдаемый эффект объясняется, прежде всего, малой долей смачиваемой растворами кислоты или основания поверхности образцов. По этой же причине обработанные ткани не окрашивались такими распространенными бытовыми загрязнителями, как кофе, фруктовые и ягодные соки. После высушивания 3 мл указанных жидкостей на поверхности ткани ее последующая промывка позволяла полностью удалить образовавшиеся пятна. Для сравнения, ткань без покрытия необратимо окрашивалась всеми перечисленными растворами.

Для оценки вклада каждого из компонентов в степень гидрофобности композиции были проведены дополнительные исследования. Так, нанесение раствора ПДМС в ТГФ на образец ткани с использованием спрей-метода привело к увеличению θ по воде по сравнению с исходной тканью. Максимальное значение θ достигнуто при концентрации ПДМС в растворе 2.5% мас. и составило $\approx 110^\circ$, что значительно ниже уровня супергидрофобности и, тем более, значения θ , достигнутого при нанесении композиции, имевшей в своем составе ФАС, «НЧ SiO_2 -ФАС» и «КНЧ-ФАС». Увеличение концентрации наносимого раствора ПДМС также отрицательно сказывалось на воздухопроницаемости ткани – если исходная ткань характеризовалась воздухопроницаемостью $19.8 \text{ см}^3/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$, то после распыления на ее поверхность раствора ПДМС (2% мас.) этот показатель снизился до $14.5 \text{ см}^3/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$.

При добавлении в раствор ПДМС ФАС (соотношение по массе ФАС/ПДМС = 2:1) θ обработанной ткани составил $\approx 148^\circ$. Увеличение или снижение соотношения ФАС/ПДМС приводило к снижению значения θ (например, $\theta \approx 128^\circ$ при соотношении ФАС/ПДМС = 3:1). Ткань с нанесенной композици-

ей, состоящей из ПДМС и НЧ SiO_2 , не модифицированных ФАС, характеризовалась стабильными супергидрофобными свойствами ($\theta \approx 165^\circ$), всего лишь немногим уступающими гидрофобности образцов, обработанных композицией, содержащей и ПДМС, и НЧ, модифицированные ФАС ($\theta = 170^\circ$). Результаты проведенных исследований свидетельствуют, что супергидрофобность являлась синергетическим эффектом присутствия «НЧ SiO_2 -ФАС» и «КНЧ-ФАС» в поверхностном слое композиции, что обеспечивало высокую степень иерархической шероховатости на наноуровне, и химической природы ПДМС и ФАС.

На наш взгляд, основной причиной высокой износостойчивости композиции являлось высокое содержание в ней НЧ и КНЧ. В результате воздействия абразива происходило небольшое по величине истончение слоя композиции на поверхности ткани (по данным СЭМ-исследований поперечных срезов образцов, примерно на 300 нм, при суммарной толщине нанесенной композиции ≈ 8 мкм). Тем не менее, при уносе встроенных в поверхностный слой композиции НЧ на их месте формировались пустоты (впадины), что также способствовало сохранению высокой степени шероховатости и гидрофобности образцов. В случае больших степеней абразивного разрушения композиции, благодаря ее высокой однородности по толщине, на поверхности оказывался новый ее слой, идентичный исходному по своей морфологии. Отметим, что после 30000 абразивных циклов как для образцов с нанесенным слоем ПДМС (без ФАС, «НЧ SiO_2 -ФАС» и «КНЧ-ФАС»), так и для образцов, покрытых композицией ПДМС/ФАС/«НЧ SiO_2 -ФАС»/«КНЧ-ФАС», происходило снижение значения θ по воде на одну и ту же величину ($\approx 6^\circ$). Возможно, высокая массовая концентрация НЧ в структуре композиции также позволила сохранить воздухопроницаемость обработанной ткани практически на исходном уровне. До нанесения композиции величина воздухопроницаемости составляла $19.8 \text{ см}^3/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$, а после – $18.2 \text{ см}^3/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$. В заключение отметим, что разработанная композиция может быть нанесена не

только на полиэфирную, но и на любой другой вид ткани или волокнистые материалы.

В [17] показана принципиальная возможность высвобождения полистирола из ядра КНЧ через SiO_2 -оболочку. На основании полученных в настоящей работе и в [17] данных на следующем этапе работы будет исследована способность разработанной композиции, нанесенной на ткань, к самовосстановлению гидрофобных свойств, утраченных в результате воздействия абразива (и, следовательно, частичного разрушения композиции). Особое внимание будет уделено условиям протекания этого процесса и его кинетике.

Заключение

В работе предложена рецептура и метод нанесения супергидрофобной композиции для тканей на основе матрицы из химически сшитого полидиметилсилоксана (ПДМС), наночастиц кремнезема (НЧ SiO_2), композитных НЧ со структурой «ядро-оболочка» (КНЧ) и фторалкилсилана (ФАС). Определены оптимальные концентрации каждого компонента с точки зрения достижения максимальной степени ее гидрофобности. Продемонстрирована высокая износостойчивость обработанных композицией образцов полиэфирной ткани к различным видам абразивного воздействия, стабильность свойств при термообработке и воздействии кислот и оснований. Установлено, что супергидрофобность является следствием сочетанного влияния всех элементов композиции. При этом нанесение композиционного состава критическим образом не снижало уровень воздухопроницаемости ткани. Полученные результаты позволяют говорить о возможности использования разработанной рецептуры для создания самоочищающихся защитных текстильных материалов и изделий на их основе для различных практических применений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Москвы (грант № 15-33-70008_мол_а_мос).

Список литературы:

1. Zhang D., Wang L., Qian H., Li X. Superhydrophobic surfaces for corrosion protection: a review of recent progresses and future directions // J. Coat. Technol. Res. 2016. V. 13. P. 11–29.
2. Cohen N., Dotan A., Dodiuk H., Kenig S. Thermomechanical mechanisms of reducing ice adhesion on superhydrophobic surfaces // Mater. & Manufact. Proc. 2016. V. 32. P. 9664–9675.
3. Park S., Kim J., Park C.H. Breathable, antistatic and superhydrophobic PET/Lyocell fabric // J. Eng. Fibers and Fabrics. 2015. V. 10. P. 1–18.

References:

1. Zhang D., Wang L., Qian H., Li X. Superhydrophobic surfaces for corrosion protection: a review of recent progresses and future directions // J. Coat. Technol. Res. 2016. V. 13. P. 11–29.
2. Cohen N., Dotan A., Dodiuk H., Kenig S. Thermomechanical mechanisms of reducing ice adhesion on superhydrophobic surfaces // Mater. & Manufact. Proc. 2016. V. 32. P. 9664–9675.
3. Park S., Kim J., Park C.H. Breathable, antistatic and superhydrophobic PET/Lyocell fabric // J. Eng. Fibers and Fabrics. 2015. V. 10. P. 1–18.

4. Pan Q., Wang M., Wang H. Separating small amount of water and hydrophobic solvents by novel superhydrophobic copper meshes // *Appl. Surf. Sci.* 2008. V. 254. P. 6002–6006.
5. Wang C., Yao T., Wu J., Ma C., Fan Z., Wang Z., Cheng Y., Lin Q., Yang B. Facile approach in fabricating superhydrophobic and superoleophilic surface for water and oil mixture separation // *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2009. V. 1. P. 2613–2617.
6. Michael N., Bharat B. Energy transitions in superhydrophobicity: low adhesion, easy flow and bouncing // *J. Phys.: Condensed Matter.* 2008. V. 20. P. 395005.
7. Mishchenko L., Hatton B., Bahadur V., Taylor J.A., Krupenkin T., Aizenberg J. Design of ice-free nanostructured surfaces based on repulsion of impacting water droplets // *ACS Nano.* 2010. V. 4. P. 7699–7707.
8. She Z., Li Q., Wang Z., Li L., Chen F., Zhou J. Researching the fabrication of anticorrosion superhydrophobic surface on magnesium alloy and its mechanical stability and durability // *Chem. Eng. J.* 2013. V. 228. P. 415–424.
9. Chen Y., Chen S., Yu F., Sun W., Zhu H., Yin Y. Fabrication and anti-corrosion property of superhydrophobic hybrid film on copper surface and its formation mechanism // *Surf. Interf. Anal.* 2009. V. 41. P. 872–877.
10. Kulinich S., Farhadi S., Nose K., Du X.W. Superhydrophobic surfaces: Are they really ice-repellent? // *Langmuir.* 2011. V. 27. P. 25–29.
11. Shi F., Niu J., Liu J., Liu F., Wang Z., Feng X. Q., Zhang X. Towards understanding why superhydrophobic coating is needed by water strider // *Adv. Mater.* 2007. V. 19. P. 2257–2261.
12. Zimmermann J., Reifler F. A., Fortunato G., Gerhardt L.-C., Seeger S. A simple, one-step approach to durable and robust superhydrophobic textiles // *Adv. Funct. Mater.* 2008. V. 18. P. 3662–3669.
13. Deng B., Cai R., Yu Y., Jiang H., Wang C., Li J., Li L., Yu M., Li J., Xie L., Huang Q., Fan C. Laundering durability of superhydrophobic cotton fabric // *Adv. Mater.* 2010. V. 22. P. 5473–5477.
14. Wang H., Xue Y., Ding J., Feng L., Wang X., Lin T. Durable, self-healing superhydrophobic and superoleophobic surfaces from fluorinated-decyl polyhedral oligomeric silsesquioxane and hydrolyzed fluorinated alkyl silane // *Angew. Chem. Int. Ed.* 2011. V. 50. P. 11433–11436.
15. Blunt L., Jiang X., Scott P.G. Advanced techniques for assessment surface topography: development of a basis for 3D surface texture standards “surfstand”. London: Kogan Page Science. 2003. 355 p.
16. Barthlott W., Neinhuis C. Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces // *Planta.* 1997. V. 202. P. 1–8.
4. Pan Q., Wang M., Wang H. Separating small amount of water and hydrophobic solvents by novel superhydrophobic copper meshes // *Appl. Surf. Sci.* 2008. V. 254. P. 6002–6006.
5. Wang C., Yao T., Wu J., Ma C., Fan Z., Wang Z., Cheng Y., Lin Q., Yang B. Facile approach in fabricating superhydrophobic and superoleophilic surface for water and oil mixture separation // *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2009. V. 1. P. 2613–2617.
6. Michael N., Bharat B. Energy transitions in superhydrophobicity: low adhesion, easy flow and bouncing // *J. Phys.: Condensed Matter.* 2008. V. 20. P. 395005.
7. Mishchenko L., Hatton B., Bahadur V., Taylor J.A., Krupenkin T., Aizenberg J. Design of ice-free nanostructured surfaces based on repulsion of impacting water droplets // *ACS Nano.* 2010. V. 4. P. 7699–7707.
8. She Z., Li Q., Wang Z., Li L., Chen F., Zhou J. Researching the fabrication of anticorrosion superhydrophobic surface on magnesium alloy and its mechanical stability and durability // *Chem. Eng. J.* 2013. V. 228. P. 415–424.
9. Chen Y., Chen S., Yu F., Sun W., Zhu H., Yin Y. Fabrication and anti-corrosion property of superhydrophobic hybrid film on copper surface and its formation mechanism // *Surf. Interf. Anal.* 2009. V. 41. P. 872–877.
10. Kulinich S., Farhadi S., Nose K., Du X.W. Superhydrophobic surfaces: Are they really ice-repellent? // *Langmuir.* 2011. V. 27. P. 25–29.
11. Shi F., Niu J., Liu J., Liu F., Wang Z., Feng X. Q., Zhang X. Towards understanding why superhydrophobic coating is needed by water strider // *Adv. Mater.* 2007. V. 19. P. 2257–2261.
12. Zimmermann J., Reifler F. A., Fortunato G., Gerhardt L.-C., Seeger S. A simple, one-step approach to durable and robust superhydrophobic textiles // *Adv. Funct. Mater.* 2008. V. 18. P. 3662–3669.
13. Deng B., Cai R., Yu Y., Jiang H., Wang C., Li J., Li L., Yu M., Li J., Xie L., Huang Q., Fan C. Laundering durability of superhydrophobic cotton fabric // *Adv. Mater.* 2010. V. 22. P. 5473–5477.
14. Wang H., Xue Y., Ding J., Feng L., Wang X., Lin T. Durable, self-healing superhydrophobic and superoleophobic surfaces from fluorinated-decyl polyhedral oligomeric silsesquioxane and hydrolyzed fluorinated alkyl silane // *Angew. Chem. Int. Ed.* 2011. V. 50. P. 11433–11436.
15. Blunt L., Jiang X., Scott P.G. Advanced techniques for assessment surface topography: development of a basis for 3D surface texture standards “surfstand”. London: Kogan Page Science. 2003. 355 p.
16. Barthlott W., Neinhuis C. Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces // *Planta.* 1997. V. 202. P. 1–8.

17. Терехин В.В., Шашкова О.Б. Композитные частицы со структурой «полистирольное ядро/ SiO_2 -оболочка» и мезопористые SiO_2 -капсулы на их основе: синтез и высвобождение загруженного вещества // Колл. журн. 2016. Т. 78. №. 6. С. 789–798.

17. Terekhin V.V., Shashkova O.B. Composite particles with the structure of "polystyrene-core/ SiO_2 -shell" and mesoporous SiO_2 -capsules based on them: Synthesis and release of the loaded substance // Kolloidnyi zhurnal (Colloid Journal). 2016. V. 78. P. 789–798. (in Russ.).

Об авторе:

Терехин Владимир Владимирович, кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории поверхностных явлений в полимерных системах ФГБУН Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН (119071, Россия, Москва, Ленинский проспект, д. 31, корп. 4).